

Е.И. БАЙДА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОЙ СКОРОСТИ РАЗГОНА МАКРОТЕЛА МНОГОСТУПЕНЧАТЫМ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИМ УСКОРИТЕЛЕМ

В статье рассматривается вопрос математического моделирования процесса разгона макротела многоступенчатым индукционно-динамическим ускорителем. Даны количественные и качественные оценки полученных результатов.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, макротело, индукционно-динамический ускоритель.

**Введение.** Идея о возможности разгона макротел электромагнитными силами была высказана достаточно давно, однако, только в последние годы такие устройства находят все более широкое применение [1]. Возможности по разгону макротел рельсотронным ускорителем были рассмотрены в работе [2].

**Цель настоящей статьи** – математическое моделирование индукционно-динамического ускорителя.

Основным недостатком рельсотронного ускорителя является значительный электроэрозионный износ направляющих, в результате которого через 3-4 выстрела они должны быть заменены.

На рис. 1 показана механическая часть ускорителя, состоящего из четырех секций. Работа ускорителя заключается в том, что при разряде накопительного конденсатора на индуктор, происходит взаимодействие электромагнитных полей индуктора и проводящей оболочки ускоряемого объекта, или самого объекта. Под действием сил Лоренца ускоряемый объект приходит в движение.

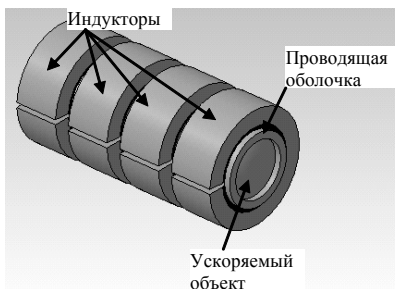


Рис. 1 – Индукционно-динамический ускоритель.

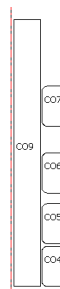


Рис. 2 – Расчетная схема.

Индукторы представляют собой массивный виток из проводящего материала, к разрезу которого подключен конденсатор. Проводящая оболочка ускоряемого объекта выполнена из алюминия. Особенностью работы является то, что появление сил Лоренца, выталкивающих объект из катушки, происходит тогда, когда геометрический центр объекта выходит за центр индуктора по ходу движения. Это означает, что подключение разрядных конденсаторов к индукторам должно осуществляться датчиками положения в определенные моменты времени.

На рис. 2 показана расчетная схема в цилиндрической системе координат, где указано: со9 – область разгоняемого объекта; со4-со7 – индукторы. Причем, длина области разгона – 90 мм, ширина – 10 мм. Индукторы со4-со7 расположены неравномерно по оси системы. Данное расположение зависит от электрических параметров и подбиралось с таким расчетом, чтобы накопительный конденсатор практически полностью разрядился, а момент начала очередного разряда подбирался из условия отсутствия торможения разгоняемого объекта, т.е. в момент времени, когда центр разгоняемого объекта поравняется с центром катушки. Индуктор со5 является исключением, в нем разряд начинается несколько позже в целях полного использования энергии первой разрядной емкости.

Для моделирования движения проводящей области использовалась экспоненциальная функция, равная единице в области разгоняемого тела и равная нулю вне разгоняемого тела. Значение проводимости в зависимости от координаты показано на рис. 3.

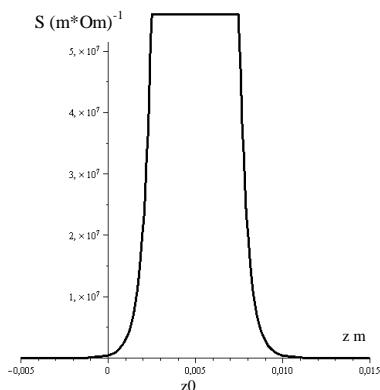


Рис. 3 – Зависимость проводимости объекта от координаты.

Очевидно, что в случае изменения координаты  $z_0$ , определяемой уравнением движения разгоняемого объекта, указанная область будет перемещаться вдоль оси  $z$ , имитируя движение разгоняемого объекта. Следовательно, проводимость  $\sigma = \sigma(z_0)$  является функцией координаты  $z_0$ .

Уравнения, описывающие процессы в электромагнитном поле будут следующие:

1. Окружающее пространство.

$$\begin{cases} \sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = 0; \\ \vec{A} = \vec{e}_\varphi \cdot A_\varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал;  $\sigma$  – проводимость.

2. Область индукторов – области со4-со7 (рис. 2).

$$\begin{cases} \sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = \left( \sigma \cdot \frac{U_c}{2 \cdot \pi \cdot r} \right) \cdot \vec{e}_\varphi; \\ \vec{A} = \vec{e}_\varphi \cdot A_\varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_c$  – напряжения на конденсаторе при условии:

$$U_c = \begin{cases} U_c, & \text{если } U_c \geq 0 \\ 0, & \text{если } U_c < 0 \end{cases}.$$

3. Уравнение для разгоняемого объекта – область со9 (рис. 2).

$$\begin{cases} \sigma(z_0) \cdot \left[ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) \right] + \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = 0; \\ \vec{A} = \vec{e}_\varphi \cdot A_\varphi, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\vec{v}$  – скорость движения объекта.

4. Уравнения электрической цепи.

Известно, что изменение напряжения на конденсаторе определяется формулой:

$$U_c = U_{c0} - \frac{1}{C_e} \cdot \int_t i \cdot dt, \quad (4)$$

где  $U_{c0}$  – начальное напряжение на конденсаторе;  $C_e$  – емкость конденсатора;  $i$  – ток разряда.

В (4) ток разряда можно определить через векторный потенциал, тогда:

$$\begin{aligned}
 i &= \int_S j_\varphi \cdot dS = \sigma \cdot \int_S \frac{\partial A\varphi}{\partial t} \cdot dS \Rightarrow \\
 U_c &= U_{c0} - \frac{\sigma}{C_e} \cdot \int_t \int_S \frac{\partial A\varphi}{\partial t} \cdot dS \cdot dt,
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где  $S$  – сечение индуктора.

5. Уравнение движения.

$$\begin{cases} m \cdot \frac{dv_z}{dt} + C_z \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot v_z^2}{2} = Q_z; \\ \frac{dz_0}{dt} = v_z, \end{cases}
 \tag{6}$$

где  $m$  – масса тела;  $v_z$  – скорость по координате  $z$ ;  $C_z$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $A$  – поперечное сечение разгоняемого тела;  $\rho$  – плотность воздуха;  $z_0$  – перемещение;  $Q_z$  – сила Лоренца по направлению.

Осевая компонента силы Лоренца в (6) определяется в области со9 на основании уравнения:

$$\vec{Q} = \int_V (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot dV,
 \tag{7}$$

где  $\vec{j}$  – вектор плотности тока;  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;  $V$  – объем разгоняемого тела.

Исходные данные для расчета:

- длина разгонного участка равна 90 мм;
- масса разгоняемого объекта  $10 \cdot 10^{-3}$  кг;
- напряжение на конденсаторе – 2 кВ;
- емкость конденсатора – 10000 мкФ.

На рис. 4 показано значение скорости объекта.

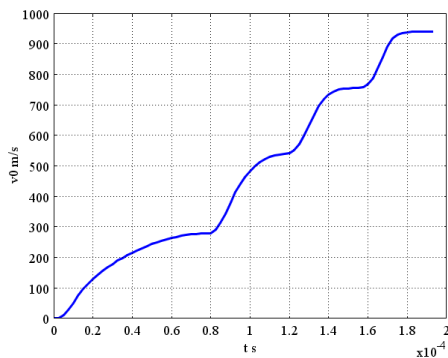


Рис. 4 – Изменение скорости объекта.

Из рис. 4 видно ступенчатое нарастание скорости по мере разряда соответствующих конденсаторов.

На рис. 5 показано значение сил Лоренца, действующих на разгоняемый объект.

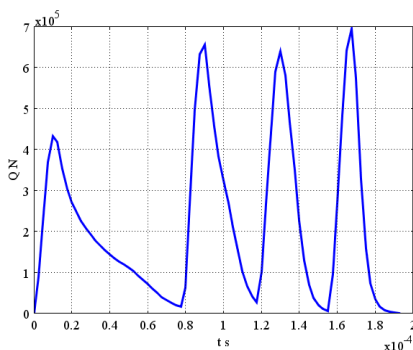


Рис.5 – Значение сил Лоренца.

Как следует из рис. 5, одинаковые значения напряжений на конденсаторах приводят к появлению разных по амплитуде сил, что, очевидно, связано с моментом начала разряда конденсаторов и скоростью движения тела. Кроме того, время разряда конденсаторов уменьшается по мере разгона объекта.

На рис. 6 показано значение наведенных токов в разгоняемом объекте. Как следует из рис. 6, наведенные токи достаточно велики и достигают сотен килоампер.

Основным недостатком данной системы является низкий КПД. Так при суммарной энергии конденсаторов в 80 кДж, кинетическая энергия разгоняемого объекта составила 4,418 кДж. Следовательно, КПД  $\approx 5,5 \%$ .

Причем, при изменении емкостей конденсаторов в два раза, во столько же раз изменилась и конечная скорость разгоняемого объекта. Кроме того, при полученных значениях скорости, сил Лоренца и размерах тела, сила аэродинамического сопротивления не оказывает существенного влияния на конечную скорость объекта.

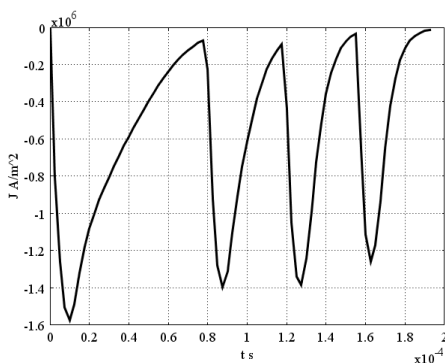


Рис. 6 – Значения наведенных токов в разгоняемом объекте.

В связи со значительными токами системы, возникает вопрос о температуре нагрева индукторов в процессе разряда конденсаторов. Для этого решалась задача адиабатического нагрева материала индукторов (малое время действия источника тепла):

$$C_t \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \cdot \nabla \vartheta) = q, \quad (8)$$

где  $C_t$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $\vartheta$  – температура;  $k$  – теплопроводность;  $q$  – объемная мощность внутренних источников тепла.

Как показывают расчеты, нагрев индуктора очень неравномерен и, несмотря на кратковременность процесса, достаточно велик.

На рис. 7 показано распределение температуры по сечению нижнего индуктора.

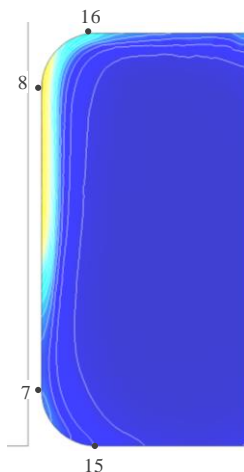


Рис. 7 – Распределение температуры по сечению индуктора.

На рис. 8 показано распределение температуры в характерных точках на поверхности индуктора (рис. 7).

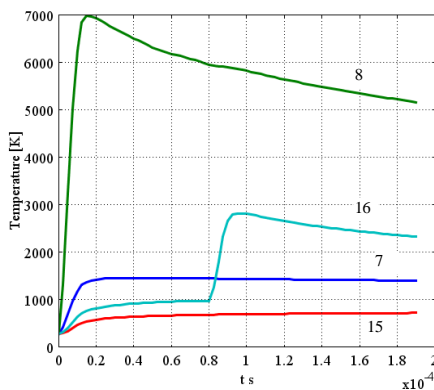


Рис.8 – Распределение температуры на поверхности индуктора

При этом толщина слоя, прогретого до температур выше температуры плавления меди, достигает глубины полутора миллиметров.

### Выводы.

1. Получена математическая модель, позволяющая проводить расчеты индукционно-динамических разгонных систем.

2. Коэффициент полезного действия такой системы невелик.

3. При полученных скоростях сила аэродинамического сопротивления мала по сравнению с силами Лоренца.

4. Скорость, достигнутая на расстоянии 90 мм достаточно велика и достигает значения 940 м/с.

5. Несмотря на кратковременность процесса, нагрев поверхности индуктора велик и превышает температуру испарения материала.

6. Для успешного разгона тела необходимо уменьшать мощность системы, растягивая процесс разгона на более длительное время и на более длинной дистанции, что так же позволяет рассчитать представленная математическая модель.

**Список литературы:** 1. Болюх В.Ф. Основні напрямки розвитку електромагнітних прискорювачів // Електротехніка і електромеханіка – Харків, 2009. – №4. – С. 7-13. 2. Байда Е.И. Теоретический анализ возможности разгона макрообъекта электромагнитным полем // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – № 61. – С. 51-56.

*Поступила в редколлегию 23.03.2013.*

УДК 621.318

**Теоретическая оценка возможной скорости разгона макротела многоступенчатым индукционно-динамическим ускорителем / Байда Е.И.** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 15 (988). – С. 3-10. Бібліогр.: 2 назв.

У статті розглядаються питання математичного моделювання процесу розгону макротіла багатоступінчатим індукційно-динамічним прискорювачем. Дані якісні та кількісні оцінки отриманих результатів.

**Ключові слова:** математичне моделювання, макротіло, індукційно-динамічний прискорювач.

In the paper a problem of mathematical modeling of the macroscopic body acceleration process by a multistage induction-dynamic booster machine is considered. Quantitative and qualitative assessments of the obtained results are given.

**Keywords:** mathematical modeling, macroscopic body, induction-dynamic booster machine.